Journal of Agroecology
Vol. 11, No.2, Summer 2019, p. 561-577

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد 11، شماره 2، تابستان 1398، ص 577-561

ارزیابی روش‌های تلقیح با باکتری بومی افزاینده رشد (.*Enterobacter* sp) بر عملکرد، اجزای عملکرد و جذب پتاسیم در برنج (.*Oriza sativa* L) (رقم ’طارم هاشمی‘)

خدیجه شهسوارپورلنده[1]، همت‌اله پیردشتی[2] و اسماعیل بخشنده[3*]

تاریخ دریافت: 1396/06/22
تاریخ پذیرش: 1396/12/08

شهسوارپور لنده، خ.، پیردشتی، ه.، و بخشنده، ا. 1398. ارزیابی روش‌های تلقیح با باکتری بومی افزاینده رشد (.*Enterobacter* sp) بر عملکرد، اجزای عملکرد و جذب پتاسیم در برنج (.*Oriza sativa* L) (رقم ’طارم هاشمی‘). بوم‌شناسی کشاورزی، 11 (2): 577-561.

چکیده

به‌منظور ارزیابی باکتری بومی افزاینده رشد (.*Enterobacter* sp) بر عملکرد، اجزای عملکرد و جذب پتاسیم برنج (.*Oriza sativa* L) (رقم ’طارم هاشمی‘) آزمایشی در یکی از مزارع زارعین واقع در شهرستان بابل از استان مازندران در سال 1395 انجام شد. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل شش سطح کود سولفات پتاسیم (صفر، 25، 50، 75، 100 و 125 کیلوگرم در هکتار) به‌عنوان کرت اصلی و تلقیح در چهار سطح (عدم تلقیح بذر یا گیاهچه به‌عنوان شاهد، تلقیح بذر در خزانه، تلقیح ریشه گیاهچه و تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه) به‌عنوان کرت فرعی بودند. طبق نتایج، اثرات اصلی تیمارها بر تمامی صفات مورد مطالعه به‌جز طول خوشه و تعداد دانه کل در خوشه معنی‌دار و اثر متقابل تیمارها غیرمعنی‌دار بود. روش‌های مختلف تلقیح موجب افزایش معنی‌دار تعداد خوشه در کپه، تعداد دانه پر در خوشه، عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، شاخص برداشت، جذب پتاسیم در دانه و جذب پتاسیم در بقایا (به‌ترتیب 8/4- 17/8، 3/5- 8/3، 14/6-19/8، 8/71- 13/2، 5/2- 5/7، 15/9-18/9 و 3/45-13/2 درصد) و کاهش تعداد دانه پوک در خوشه (به مقدار 58/3-61/6 درصد) نسبت به شاهد شدند. همچنین، با مصرف کود پتاسیم از صفر تا 125 کیلوگرم در هکتار مقدار تمامی صفات اندازه‌گیری شده به‌ویژه عملکرد دانه (18/2 درصد بیشتر از شاهد) افزایش یافت. درمجموع، تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه با باکتری از طریق بهبود صفات اجزای عملکرد و جذب پتاسیم بر روش‌های دیگر برتری داشت. درنتیجه، از این تیمار به‌خوبی می‌توان در مقادیر کاهش‌یافته کود پتاسیم (حدود 25 کیلوگرم در هکتار) جهت رسیدن به کشاورزی پایدار به‌ویژه در زراعت برنج استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: ریشه گیاه، کشاورزی پایدار، کود سولفات پتاسیم، نشاء کاری

مقدمه

از میان غلات دانه‌ریز، برنج (.*Oryza sativa* L) پس از گندم مهم‌ترین محصول غذایی در جهان و ایران محسوب می‌شود. به‌طوری‌که با توجه به نرخ رشد جمعیت، جهت تأمین نیاز غذای بشر در دنیا تولید این محصول تا سال 2020 میلادی باید به مقدار 65 درصد افزایش یابد (Fageria, 2015). برنج در ایران نیز به‌عنوان دومین محصول غذایی راهبردی در سطحی معادل 590 هزار هکتار کشت می‌گردد. تولید سالانه این محصول در کشور معادل دو میلیون و 655 هزار تن با میانگین عملکرد دانه 4/5 تن در هکتار می‌باشد (FAO, 2015). پتاسیم بعد از نیتروژن و فسفر، یکی از مهم‌ترین عناصر پرمصرف برای گیاهان محسوب می‌شود (Meena et al., 2016). این عنصر از طریق افزایش تعداد پنجه، تعداد خوشه، تعداد خوشچه‌های بارور و طول خوشه (Anjanadevi et al., 2015)،

1، 2 و 3- به‌ترتیب دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشیار گروه زراعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، و استادیار پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری کشاورزی طبرستان
(*- نویسنده مسئول: Email: Bakhshandehsmail@gmail.com)
Doi:10.22067/jag.v11i2.67375

تسهیل در جذب نیتروژن و فسفر، افزایش فعالیت آنزیم‌ها، مقاومت به بیماری و آفات، ضخیم و طویل شدن ریشه‌ها و ساقه‌ها نقش مهمی در رشد، توسعه و عملکرد گیاهان ایفا می‌نماید (Akbarlo 2013). مقدار پتاسیم محلول در خاک معمولا بسیار ناچیز بوده (حدود یک تا دو درصد) و بیش از 90 تا 98 درصد از آن به شکل نامحلول و غیرقابل جذب برای گیاه می‌باشد (Bakhshandeh et al., 2015). کمبود پتاسیم در برنج، کاهش فتوسنتز، عقیمی دانه گرده، کاهش تعداد دانه‌های پر، عملکرد دانه، بیولوژیک و شاخص برداشت را به همراه دارد (Ding et al., 2006; Esfahani et al., 2005). علاوه بر این، کاربرد سولفات پتاسیم موجب افزایش طول خوشه، وزن هزار دانه، تعداد دانه پر در خوشه و در نهایت عملکرد دانه برنج گردید (Ghasemi-Mianaie et al., 2014). این محققین علت افزایش 2/8 درصدی عملکرد دانه برنج را به افزایش تعداد کل دانه در خوشه نسبت دادند. در پژوهشی دیگر، افزایش تعداد پنجه، تعداد دانه، عملکرد دانه و جذب پتاسیم برنج در زمان مصرف کود کلرور پتاسیم گزارش شد (Bahmanyar & Soodaee Mashaee, 2010).

امروزه مصرف بیش از حد نهاده‌های شیمیایی و آلودگی‌های زیست‌محیطی سبب شده تا استفاده هر چه کمتر از کودهای شیمیایی در تولید محصولات سالم مورد توجه بسیاری از محققین و کشاورزان قرار گیرد (Anjanadevi et al., 2015). به هر حال، کاربرد باکتری‌های افزاینده رشد به‌عنوان یک راهکار مفید جهت کاهش مصرف کودهای شیمیایی و رسیدن به کشاورزی پایدار پیشنهاد شده است (Bakhshandeh et al., 2014). به‌طورکلی، این باکتری‌ها به دو روش مستقیم (تثبیت نیتروژن، تولید برخی از هورمون‌های گیاهی، انحلال ترکیبات نامحلول و تولید آنزیم‌ها) و غیرمستقیم (تولید سیدروفور، سیانید هیدروژن، خصوصیات بیوکنترلی، فعال‌سازی سیستم القاء مقاومت در گیاه و تسهیل جذب عناصر غذایی) باعث بهبود رشد گیاهان میزبان خواهند شد (Ahemad & Kibret, 2014)؛ علاوه بر این، از طریق بهبود حاصلخیزی خاک و تأمین سلامت گیاه به پایداری و تعادل سیستم زنده خاک کمک کرده و انباشت آلاینده‌های شیمیایی در محیط زیست را کاهش خواهند داد (Miransari, 2013; Mwashasha et al., 2016).

تلقیح بذر گندم با باکتری‌های *Pantoea agglomerans* و *Pseudomonas putida* موجب افزایش معنی‌داری وزن هزار دانه، تعداد دانه و سنبله نسبت به شاهد گردید (Sarikhani et al., 2013).

به‌طور مشابه،دوی و همکاران (Duy et al., 2016) بیان داشتند که تلقیح توأم باکتری *Azospirillum* sp. و *Pseudomonas* sp. باعث افزایش عملکرد دانه، تعداد پنجه، وزن ریشه و وزن هزار دانه برنج شد. در آزمایشی دیگر، افزایش عملکرد دانه و تعداد خوشه برنج نیز در زمان تلقیح باکتری *Azospirillum* گزارش گردید (Hahn et al., 2016). مواشاشا و همکاران (Mwashasha et al., 2016) نیز نشان دادند که تلقیح برنج با باکتری‌های *Bacillus*، *Enterobacter* و *Aspergillus* باعث بهبود عملکرد و اجزای عملکرد شد.

ریشه گیاهچه‌های برنج تلقیح‌شده با باکتری *Enterobacter* sp. در هر دو شرایط گلدانی و مزرعه‌ای موجب افزایش عملکرد دانه و بیولوژیک نسبت به شاهد شد (Bakhshandeh et al., 2015). محمدی‌کشکا (Mohammadi-Kashkah, 2016) در گندم (*Triticum aestivum* L.) بیان داشتند که کاربرد باکتری *Enterobacter* sp. باعث افزایش حدود چهار درصدی طول سنبله و همچنین مصرف همزمان 100 کیلوگرم در هکتار سوپرفسفات‌تریپل و *Enterobacter* sp. موجب افزایش حدود 26 درصدی عملکرد دانه شد. محققین علت افزایش عملکرد و اجزای عملکرد گیاهان در زمان حضور باکتری‌های افزاینده رشد را به تولید هورمون ایندول استیک اسید و انحلال فسفر نامحلول توسط این ریزجانداران نسبت دادند (Lavakush and et al., 2014; Bakhshandeh et al., 2017a; Ramezanpour et al., 2010). ژانگ و همکاران (Zhang and et al., 2014) بیان نمودند که کاربرد باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم موجب افزایش ماده خشک و جذب عناصر غذایی به‌ویژه پتاسیم در تنباکو (*Nicotiana tabacom* L.) شد. کاربرد باکتری *Enterobacter* sp. به‌صورت تلقیح ریشه و خاک مزرعه موجب افزایش جذب پتاسیم برگ در گیاهچه‌های برنج به‌میزان 69 درصد نسبت به شاهد شد (Bakhshandeh et al., 2017).

به طورکلی، تا به امروز از روش‌های مختلفی جهت تلقیح گیاهان مختلف استفاده شده است که از جمله آن می‌توان به تلقیح بذر و یا ریشه برنج (Bakhshandeh et al., 2015, 2017b)، تلقیح بذر در گندم (Mohammadi-Kashkah, 2016)، تلقیح خاک در کشت گندم (Hussain et al., 2016)، تلقیح بذر به همراه محلول‌پاشی برگ برنج (Duy et al., 2016)، تلقیح ریشه به همراه محلول‌پاشی برگ برنج (Asghari et al., 2014) اشاره نمود. هر یک از این محققین یکی از روش‌های فوق را به عنوان بهترین روش تلقیح

گزارش نمودند. به عنوان مثال، دقیقیان و همکاران (Daghighian et al., 2011) روش تلقیح بذر به همراه محلول‌دهی پای بوته در مرحله گیاهچه‌ای در لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) را به‌عنوان بهترین روش برای رسیدن به بالاترین عملکرد دانه در این گیاه (1807 کیلوگرم در هکتار) گزارش کردند. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی روش‌های مختلف کاربرد باکتری بومی افزاینده رشد *Enterobacter* sp. بر عملکرد، اجزای عملکرد و جذب پتاسیم گیاه برنج (رقم 'طارم هاشمی') به‌همراه مصرف سطوح مختلف کود سولفات پتاسیم اجرا شد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به‌منظور ارزیابی اثر روش‌های مختلف تلقیح با باکتری بومی افزاینده رشد بر عملکرد، اجزای عملکرد و جذب پتاسیم گیاه برنج (رقم 'طارم هاشمی') تحت تأثیر سطوح مختلف کود پتاسیم در سال زراعی 1395 در یکی از مزارع زراعین واقع در روستای آقاملک از توابع شهرستان بابل استان مازندران با طول جغرافیایی 52 درجه و 56 دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی 36 درجه و 46 دقیقه شمالی با ارتفاع 25 متر از سطح آب‌های آزاد اجرا گردید. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. تیمارها شامل شش سطح کود سولفات پتاسیم 44 درصد تهیه شده از شرکت‌های حمایتی کشاورزی (صفر، 25، 50، 75، 100 و 125 کیلوگرم در هکتار) به‌عنوان کرت اصلی و روش‌های تلقیح با باکتری *Enterobacter* sp. در چهار سطح (عدم تلقیح بذر یا گیاهچه به عنوان شاهد، تلقیح بذر در خزانه، تلقیح ریشه گیاهچه و تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه) به‌عنوان کرت فرعی بودند. باکتری بومی افزاینده رشد *Enterobacter* sp. از پژوهشکده ژنتیک و زیست‌فناوری کشاورزی طبرستان، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تهیه شد. این باکتری از خاک مزارع برنج استان مازندران جداسازی شد که دارای توانایی حل‌کنندگی فسفات نامحلول (254 میکروگرم در میلی‌لیتر از منبع تری‌کلسیم‌فسفات بعد از پنج روز)، پتاسیم نامحلول (33/6 میکروگرم در میلی‌لیتر از منبع میکا بعد از بیست و پنج روز) و تولید ایندول استیک اسید (3 میکروگرم در میلی‌لیتر بعد از سه روز) در هر دو شرایط هوازی و غیرهوازی می‌باشد (Bakhshandeh et al., 2014, 2017b).

در این آزمایش، از گیاهچه‌های برنج حاصل از تلقیح بذر در مرحله بذرپاشی (بذرهای جوانه‌دار برنج با طول ریشه‌چه حدود سه میلی‌متر مطابق با روش پیشنهاد شده توسط بخشنده و همکاران (Bakhshandeh et al., 2017b) به‌مدت پنج ساعت در سوسپانسیون حاوی باکتری (با جمعیت حدود 10^7 سلول زنده در هر میلی‌لیتر) غوطه‌ور شده و سپس اقدام به بذرپاشی شد) به‌عنوان تلقیح بذر در خزانه استفاده گردید. در زمان نشاءکاری نیز بعد از کندن گیاهچه‌ها برنج (مرحله 5-4 برگی) از خزانه (بدون تلقیح)، ریشه آن‌ها به‌مدت 12 ساعت در سوسپانسیون باکتری غوطه‌ور شدند. در روش ترکیبی نیز از گیاهچه‌های تلقیح‌شده در مرحله خزانه به‌همراه تلقیح ریشه همان گیاهچه‌ها در زمان نشاءکاری استفاده شد. برای جلوگیری از ایجاد خطا در شرایط شاهد، ریشه گیاهچه‌های برنج تنها با محیط کشت نوترینت براث [1] بدون باکتری تیمار شدند (Bakhshandeh et al., 2015). پس از اعمال تیمارها، در تاریخ 18 اردیبهشت ماه در هر کپه برنج، سه گیاهچه به‌صورت دستی کشت شدند. هر کرت به‌طول پنج متر و عرض دو متر شامل 10 ردیف کشت با فاصله ردیف 20 سانتی‌متر و روی ردیف 20 سانتی‌متر بود (کشت مربعی). بر اساس نتایج آزمون خاک (جدول 1)، کود پایه سوپرفسفات‌تریپل (50 کیلوگرم در هکتار) و تیمارهای مختلف کود سولفات پتاسیم قبل از کاشت و کود اوره در سه مرحله (50 کیلوگرم در هکتار قبل از کاشت، 35 کیلوگرم در هکتار سه هفته بعد از نشاءکاری و 35 کیلوگرم در هکتار در زمان ظهور خوشه) به زمین اضافه شدند.

تمامی عملیات زراعی از قبیل آبیاری، کنترل علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها برای همه کرت‌ها در زمان ضروری و به‌صورت یکنواخت انجام شد. از زمان شروع آزمایش تا دو هفته قبل از برداشت، آبیاری به گونه‌ای انجام شد تا ارتفاع آب در سطح مزرعه حدود سه تا پنج سانتی‌متر باشد (به جزء 25 روز بعد از نشاءکاری، قبل از ساقه رفتن و بعد مرحله گرده افشانی که زمین جهت تهویه خاک نسبتا خشک گردید). در مرحله رسیدگی کامل (82 روز پس از کاشت) پس از حذف اثر حاشیه‌ای یک مترمربع از هر کرت به روش تخریبی برداشت و عملکرد دانه و بیولوژیک واقعی اندازه‌گیری گردید. همچنین، صفات اجزای عملکرد مانند تعداد خوشه در کپه، تعداد دانه در خوشه (پر و خالی به تفکیک)، طول خوشه (با استفاده از خط‌کش) و وزن هزار دانه (محاسبه شده از سه تکرار 100 عددی) بر روی ده بوته انتخاب شده

1- Nutrient broth

به صورت تصادفی اندازه‌گیری و ثبت شدند.

جدول 1- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای آزمایش (عمق صفر تا 30 سانتی‌متری)
Table 1- Some physicochemical characteristics of the soil (depth of 0–30 cm)

بافت Texture	درصد ذرات خاک Soil particles (%)			شوری Electrical conductivity (dS. m^{-1})	اسیدیته pH	مواد آلی Organic carbon (%)	فسفر Phosphorus (ppm)	پتاسیم Potassium (ppm)
	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand					
لومی رسی Clay loamy	33	43	24	0.63	7.76	1.59	39	125

شاخص برداشت از تقسیم عملکرد اقتصادی به عملکرد بیولوژیک ضربدر صد محاسبه گردید. محتوای پتاسیم در دانه و بقایا برنج به روش پیشنهاد شده توسط استفان و همکاران (Estefan et al., 2013) و به کمک دستگاه فلیم‌فتومتر[1] اندازه‌گیری شد. در نهایت، به منظور توصیف روند تغییرات صفات مورد مطالعه در مقابل سطوح مختلف کود سولفات پتاسیم از معادلات رگرسیونی خطی و دوتکه‌ای استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری SAS نسخه 9/4 و برای ترسیم شکل‌ها از نرم‌افزار SigmaPlot نسخه 11 استفاده گردید. مقایسه میانگین‌ها نیز به‌روش حداقل تفاوت معنی‌دار (LSD) در سطح احتمال پنج درصد صورت گرفت.

نتایج و بحث

تعداد خوشه در کپه

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که تمامی صفات مورد مطالعه به‌جز طول خوشه و تعداد دانه کل در خوشه به طور معنی‌داری تحت تأثیر سطوح مختلف کود پتاسیم و روش‌های مختلف تلقیح قرار گرفتند، اما اثرات متقابل بین تیمارها معنی‌دار نبود (جدول 2).

دامنه تغییرات تعداد خوشه در کپه از 6/9 تا 14/0 عدد متغیر بود. تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه، تلقیح ریشه گیاهچه و تلقیح در خزانه به‌ترتیب باعث افزایش 13/6، 17/8 و 8/4 درصدی و مصرف کود سولفات پتاسیم از صفر تا 125 کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار باعث افزایش 6/35 درصدی تعداد خوشه در کپه نسبت به شرایط شاهد شد (جدول 3). برای کمّی‌سازی روند تغییرات تعداد خوشه در کپه در مقابل کود پتاسیم از یک معادله ساده خطی استفاده گردید (شکل 1الف، جدول 4). طبق نتایج مطالعه حاضر بیشترین میزان افزایش تعداد خوشه در کپه در تیمار تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه و کمترین مقدار آن در شاهد مشاهده گردید. به طور مشابه، بخشنده و همکاران (Bakhshandeh et al., 2015) بهبود 22/1 درصدی تعداد خوشه در کپه برنج تلقیح‌شده با باکتری *Enterobacter* sp. را گزارش نمودند. حسین و همکاران (Hussain et al., 2016) اظهار داشتند که تلقیح خاک با باکتری *Bacillus* sp. به همراه مصرف 75 و 105 کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب کود نیتروژن و فسفر باعث افزایش 102/4 درصدی تعداد ساقه بارور گندم نسبت به شاهد شد. در آزمایشی دیگر، تلقیح گندم با باکتری‌های *P. putida* و *Pantoea agglomerans* موجب افزایش تعداد سنبله و وزن هزار دانه به‌ترتیب 20 و 70 درصد نسبت به شاهد گردید (Sarikhani et al., 2013). در همین راستا، سایر محققین اظهار داشتند که تلقیح برنج با باکتری *Azospirillum* به همراه مصرف 120 کیلوگرم کود نیتروژنه تعداد خوشه در کپه را 9/35 درصد نسبت به شاهد افزایش داد که علت آن را تأمین کارآمد مواد غذایی، هورمون‌های گیاهی و تولید ایندول استیک اسید بیان داشتند (Hahn et al., 2016). به‌طور کلی، این ریزجانداران با استقرار در ریشه گیاه و تولید آنزیم‌ها و هورمون‌های گیاهی، ویتامین‌ها، سیدروفور، مواد افزاینده رشد و توانایی انحلال مواد معدنی و مواد مغذی موجب بهبود اجزای عملکرد و عملکرد گیاه میزبان خواهند شد (Ahemad & Kibret, 2014; Ebrahimi-Chamani et al., 2014).

طول خوشه

بر اساس نتایج مطالعه حاضر کاربرد روش‌های مختلف تلقیح و یا مصرف کود پتاسیم باعث افزایش طول خوشه گردید اگرچه اختلاف بین تیمارها معنی‌دار نبود. دامنه تغییرات این صفت از 23/5 تا 26/4 سانتی‌متر متغیر بود (جدول 2).

1- Flame photometer

جدول ۲- تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تیمارهای کود پتاسیم و روش‌های مختلف تلقیح با باکتری *Enterobacter* sp. بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج

Table 2- Analysis of variance (mean squares) of the effects of potassium fertilizer and different methods of inoculation with *Enterobacter* sp. on yield and yield components of rice

منابع تغییرات S.O.V.	درجه آزادی df	تعداد خوشه در کپه Number of panicle per hill	طول خوشه Panicle length	تعداد دانه کل در خوشه Total number of grain per hill	تعداد دانه پر در خوشه Number of filled grain per hill	تعداد دانه پوک در خوشه Number of empty grain per hill	وزن هزار دانه 1000-grain weight	عملکرد دانه Grain yield	عملکرد بیولوژیک Biological yield	شاخص برداشت Harvest index	جذب پتاسیم در دانه Potassium uptake in grain	جذب پتاسیم بقایا Potassium uptake in straw
تکرار Replication	2	28.8	0.32	442.5	347.3	2.92	10.02	10721	33339	49.7	66.6	2569
(پتاسیم) Potassium (a)	5	3.09*	0.16 ns	132.8 ns	230.1*	18.53**	3.09 *	9911*	33466*	9.58**	75.71**	946.8 ns
خطای اصلی Error a	10	0.99	0.43	147.4	123.08	2.40	2.01	1785	8975	5.90	10.90	663.5
(روش تلقیح) Inoculation method (b)	3	10.07**	0.22 ns	105.3 ns	188.6*	57.67**	2.62 ns	22369**	76306**	18.0*	123.1**	2044*
روش تلقیح × پتاسیم b×a	15	1.25 ns	0.25 ns	56.6 ns	59.06 ns	3.01 ns	2.68 ns	1901 ns	19289 ns	5.92 ns	16.55 ns	970.8 ns
خطای فرعی Error	36	1.99	0.50	67.16	58.39	2.14	3.70	1497	10727	5.09	13.52	619.8
ضریب تغییرات CV (%)	-	13.4	2.81	8.05	7.80	8.72	7.81	8.47	8.19	6.24	10.74	12.43

* و ** : به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال پنج و یک درصد و ns: غیرمعنی‌دار

* and **: are significant at 5 and 1% probability levels, respectively and ns, non-significant

در مجموع، به ازای هر کیلوگرم مصرف کود سولفات پتاسیم طول خوشه به طور خطی و به میزان 0/0007 سانتی‌متر در کیلوگرم افزایش یافت (شکل 1ب). گیلانی و همکاران (Gilani et al., 2017) افزایش 2/96 تا 4/65 درصدی طول خوشه برنج را در حضور ریزجانداران افزاینده رشد و یا مقادیر مختلف کود سولفات پتاسیم ذکر نمودند. زکوی و همکاران (Zakavi et al., 2012) پس از مصرف 90 کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم افزایش طول خوشه برنج به‌میزان 10/5 درصد را نسبت به شاهد گزارش کردند.

لواکوش و همکاران (Lavakush et al., 2014) بعد از دو سال آزمایش تحت شرایط گلخانه، افزایش تعداد پنجه بارور، طول پانیکول و عملکرد دانه برنج تلقیح‌یافته با چند سویه از *Pseudomonas* در سطوح کود فسفر را گزارش نمودند، که دلیل افزایش رشد را به سنتز هورمون ایندول استیک اسید و انحلال عناصر نامحلول توسط این باکتری‌ها نسبت دادند. همچنین اصغری و همکاران (Asghari et al., 2013) بیان نمودند که این ریزجانداران با تولید هورمون بیشتر مثل جیبرلین، اکسین و فیتوهورمون‌ها نقش مهمی در افزایش انشعابات و طول خوشه دارند.

تعداد دانه کل و پر در خوشه

تعداد دانه کل و پر در خوشه به‌ترتیب از 83/7 تا 124/2 و 80/0 تا 122/2 عدد متغیر بود. تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه، تلقیح ریشه گیاهچه و تلقیح در خزانه به‌ترتیب باعث افزایش 0/6، 0/9 و 5/2 درصدی تعداد کل دانه در خوشه و 3/6، 3/5 و 8/3 درصدی تعداد دانه پر در خوشه نسبت به شاهد شد. علاوه بر این، مصرف کود سولفات پتاسیم از صفر تا 125 کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار به‌ترتیب باعث افزایش 7/3 و 10/8 درصدی این صفات نسبت به شاهد گردید (جدول 3). به‌طور مشابه، برای توصیف روند تغییرات تعداد دانه کل و تعداد دانه پر در خوشه در مقابل کود پتاسیم نیز از یک معادله ساده خطی استفاده شد (شکل 1ث). از آنجایی که تعداد کل دانه در خوشه به طور معنی‌دار تحت تأثیر روش‌های مختلف تلقیح قرار نگرفت. بنابراین، یک معادله خطی به میانگین داده‌های حاصل از این روش‌ها برازش داده شد. طبق نتایج، با افزایش هر کیلوگرم کود پتاسیم تعداد کل دانه در خوشه به میزان 0/0668 عدد افزایش یافت (شکل 1پ). همچنین، بالاترین شیب افزایش تعداد دانه پر در خوشه متعلق با تیمار تلقیح بذر در خزانه بود که در نهایت باعث تولید تعداد دانه پر بیشتر در خوشه گردید (جدول 4).

در پژوهشی مشابه، محققین اظهار داشتند که حضور باکتری‌های *P. putida, P. fluorescens, Enterobacter* sp. و *Rahnella aquatitlis* موجب افزایش تعداد و وزن دانه در کپه برنج گردید (Bakhshandeh et al., 2015). زکوی و همکاران (Zakavi et al., 2012) افزایش 16/4 درصدی عملکرد دانه برنج در زمان مصرف کود کلرور پتاسیم را به افزایش طول خوشه، تعداد خوشه در مترمربع، تعداد دانه پر در خوشه و وزن هزار دانه نسبت دادند، همچنین بیان داشتند که کمبود پتاسیم موجب عقیمی دانه‌های گرده در مرحله آبستنی و در نتیجه افزایش تعداد دانه‌های پوک در خوشه گردید. در آزمایشی دیگر، با مصرف 23 و 30 کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و کلرور پتاسیم، تعداد دانه در خوشه 22/6 درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (Bahmanyar & Soodaee Mashaee, 2010). قاسمی‌میانایی و همکاران (Ghasemi-Mianaie et al., 2014) نیز با مصرف 250 کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم افزایش طول خوشه، تعداد کل دانه در خوشه، تعداد دانه پر و عملکرد دانه برنج را به‌ترتیب 0/08، 4/4، 1/20 و 2/9 درصد نسبت به شاهد گزارش کردند. در پژوهشی دیگر، تعداد و وزن دانه در سنبله گندم (رقم 'میلان') در زمان کاربرد باکتری *Enterobacter* sp. به‌ترتیب 31/5 و 27/4 درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (Mohammadi Kashkah 2016). در مجموع، دلیل افزایش این صفات را به توانایی ریزجانداران به جذب عناصر غذایی نسبت دادند (Asghari et al., 2013).

تعداد دانه پوک در خوشه

کمترین و بیشترین تعداد دانه پوک در خوشه به‌ترتیب 1 و 11 عدد بود. تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه، تلقیح ریشه گیاهچه و تلقیح در خزانه به‌ترتیب باعث کاهش معنی‌دار 60/0، 61/6 و 58/3 درصدی و مصرف کود سولفات پتاسیم از صفر تا 125 کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار باعث کاهش 53/8 درصدی تعداد دانه پوک در خوشه نسبت به شاهد شد (جدول 3). روند تغییرات تعداد دانه پوک در خوشه در مقابل مقادیر مختلف کود پتاسیم از یک معادله دوتکه‌ای پیروی می‌کرد.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای کود پتاسیم و روش‌های مختلف تلقیح با باکتری *Enterobacter* sp. بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج

Table 3- Mean comparisons of the effect of potassium fertilizer and different methods of inoculation with *Enterobacter* sp. on yield and yield components of rice

تیمارها Treatments	تعداد خوشه در کپه Number of panicle per hill	طول خوشه (سانتی‌متر) Panicle length (cm)	تعداد دانه کل در خوشه Total number of grain per hill	تعداد دانه پر در خوشه Number of filled grain per hill	تعداد دانه پوک در خوشه Number of empty grain per hill	وزن هزار دانه 1000-grain weight (g)	عملکرد دانه Grain yield (kg ha^{-1})	عملکرد بیولوژیک Biological yield (kg ha^{-1})	شاخص برداشت Harvest index (%)	جذب پتاسیم دانه K uptake in grain (mg per plant)	جذب پتاسیم بقایا K uptake in straw (mg per plant)
کود پتاسیم Potassium fertilizer											
0	10.07 b	25.0 a	98.6 a	93.2 b	5.2 b	24.2 ab	4232 c	12071 b	35.0 b	30.9 d	193.41 a
25	10.2 (+1.88) b	25.2 (+0.5) a	98.6 (+0.0) a	93.2 (+0.0) b	4.5 (-13.1) b	24.1 (+0.0) b	4376 (+3.40) c	12281 (+1.73) b	35.8 (+2.28) ab	32.72 (+5.61) cd	193.42 (0.00) a
50	10.1 (+0.09) b	25.3 (+1.2) a	101.6 (+3.0) a	98.2 (+5.3) ab	2.8 (-46.1) a	24.3 (+0.4) ab	4402 (+4.02) bc	12371 (+2.48) b	35.5 (+1.42) ab	33.11 (+6.86) bcd	194.31 (+0.46) a
75	10.4 (+3.27) b	25.1 (+0.4) a	101.3 (+2.7) a	99.0 (+6.2) ab	2.2 (-57.6) a	24.6 (+1.7) ab	4602 (+8/78) bc	12563 (+4.07) ab	36.7 (+4.85) ab	34.45 (+11.2) bc	197.20 (+1.95) a
100	11.4 (+13.2) a	25.0 (+0.0) a	105.4 (+6.9) a	101.2 (+8.6) ab	2.6 (-50.0) a	24.9 (+3.0) ab	4782 (+13.0) ab	13244 (+9.71) a	36.0 (+2.85) ab	36.02 (+16.2) ab	210.97 (+9.07) a
125	10.7 (+6.35) ab	25.3 (+1.2) a	105.8 (+7.3) a	103.3 (+10.8) a	2.4 (-53.8) a	25.4 (+5.2) a	5002 (+18.2) a	13346 (+10.5) a	37.6 (+7.42) a	38.00 (+22.6) a	212.15 (+9.68) a
روش تلقیح Inoculation method											
شاهد Control	9.5b	25.1 a	100.0 a	94.2 b	6.0 b	24.0 a	4054 b	11740 b	34.6 b	30.34 b	190.21 b
تلقیح ریشه گیاهچه Seedling inoculation	11.2 (+17.8) a	25.3 (+ 0.5) a	100.9 (+0.9) a	97.5 (+3.5) ab	2.3 (-61.6) a	24.6 (+2.5) a	4707 (+16.1) a	12789 (+8.93) a	36.6 (+5.78) a	35.25 (+16.1) a	196.79 (+3.45) ab
تلقیح در خزانه Seed inoculation	10.3 (+8.40) ab	25.1 (+0.0) a	105.3 (+5.2) a	102.1 (+8.3) a	2.5 (-58.3) a	24.8 (+3.3) a	4649 (+14.6) a	12763 (+8.71) a	36.4 (+5.20) a	35.18 (+15.9) a	198.69 (+4.45) ab
تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه Seed + seedling inoculation	10.8 (+13.6) a	25.1 (+0.0) a	100.7 (+0.6) a	97.6 (+3.6) ab	2.4 (-60.0) a	24.9 (+3.7) a	4857 (+19.8) a	13292 (+13.2) a	36.6 (+5.78) a	36.09 (+18.9) a	215.27 (+13.2) a

† حروف مشترک در هر ستون نشان‌دهندهٔ عدم اختلاف معنی‌دار از لحاظ آماری در سطح احتمال پنج درصد می‌باشد. اعداد داخل پرانتز بیانگر درصد افزایش (+) و یا کاهش (-) هر یک از تیمارها نسبت به شرایط شاهد می‌باشد.

† Means with the same letter are not significantly different at the probability level of 0.05%. Values in parentheses indicate percent change (positive or negative) in the respective studied traits in comparison with the control condition.

جدول ٤- پارامترهای تخمین‌زده شده توسط مدل دوتکه‌ای و خطی جهت توصیف تغییرات صفات مورد مطالعه در مقابل مقدار مصرف کود سولفات پتاسیم در روش‌های مختلف بذر و گیاهچه برنج با باکتری *Enterobacter* sp.

Table 4. Estimated parameter values by segmented and linear models for describing the relationship between studied traits and potassium sulfate fertilizer at different levels of rice seed and seedling inoculations with *Enterobacter* sp.

صفات Traits	Inoculation methods	روش تلقیح	a ± se	b ± se	x_0 ± se	R^2
Number of empty grain per hill	Control	شاهد	9.63 + 1.14	-0.15 + 0.06	28.6 + 9.32	0.80
تعداد دانه پوک در خوشه	Seedling inoculation	تلقیح ریشه گیاهچه	3.89 + 0.68	-0.02 + 0.02	75.0 + 21.6	0.75
	Seed inoculation	تلقیح در خزانه	5.08 + 0.62	-0.05 + 0.01	73.0 + 21.1	0.89
	Seed + seedling inoculation	تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه	4.28 + 0.26	-0.03 + 0.00	107 + 14.6	0.96
Number of filled grain per hill	Control	شاهد	90.30 + 3.41	0.060 + 0.04	-	0.32
تعداد دانه پر در خوشه	Seedling inoculation	تلقیح ریشه گیاهچه	92.57 + 3.27	0.079 + 0.04	-	0.45
	Seed inoculation	تلقیح در خزانه	93.05 + 3.45	0.140 + 0.04	-	0.70
	Seed + seedling inoculation	تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه	93.23 + 1.45	0.071 + 0.01	-	0.77
Number of panicle per hill	Control	شاهد	8.60 + 0.15	0.001 + 0.0002	-	0.18
تعداد خوشه در کپه	Seedling inoculation	تلقیح ریشه گیاهچه	9.72 + 0.29	0.013 + 0.0031	-	0.63
	Seed inoculation	تلقیح در خزانه	10.4 + 0.23	0.010 + 0.0031	-	0.81
	Seed + seedling inoculation	تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه	10.1 + 0.49	0.011 + 0.0060	-	0.43

se, Standard error.

طبق نتایج در شرایط شاهد (عدم مصرف کود و عدم تلقیح) تا زمان مصرف 28/6 کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم، به ازای هر کیلوگرم افزایش مصرف کود، تعداد دانه پوک به میزان 0/154 عدد در خوشه کاهش یافت و سپس تا 125 کیلوگرم در هکتار مقدار آن ثابت باقی ماند (جدول 4 و شکل 1ج). به طورکلی، مقدار اولیه این صفت در زمان عدم مصرف کود پتاسیم در روش‌های مختلف تلقیح پایین‌تر از شاهد بود. علاوه بر این، میزان کاهش این صفت به ازای هر کیلوگرم افزایش مصرف کود پتاسیم در شاهد (0/154 عدد) سریع‌تر از تیمارهای توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه، تلقیح ریشه گیاهچه و تلقیح در خزانه به‌ترتیب 0/03، 0/02 و 0/05 عدد برآورد گردید (جدول 4). مجموع عوامل فوق سبب شده است تا تعداد دانه پوک در خوشه در زمان کاربرد روش‌های مختلف تلقیح با *Enterobacter* sp. و یا مصرف کود سولفات پتاسیم به طور چشمگیری کاهش یابد. به طور مشابه، کاربرد ریزجانداران افزاینده رشد به همراه کود سولفات پتاسیم در برنج موجب کاهش تعداد دانه پوک در خوشه به مقدار 20 تا 46 درصد نسبت به شاهد گردید (Gilani et al., 2017). در پژوهشی دیگر محققین گزارش نمودند که مصرف کود پتاسیم به تنهایی باعث کاهش معنی‌دار تعداد دانه‌های پوک در برنج شد (Bahmanyar & Soodaee Mashaee, 2010).

وزن هزار دانه

محدوده تغییرات وزن هزار دانه از 22/1 تا 33/1 گرم متغیر بود (با میانگین 24/62 گرم). روش‌های مختلف تلقیح باعث افزایش 2 تا 3/5 درصدی این صفت شد، اگر چه اختلاف بین این روش‌ها از نظر آماری معنی‌دار نبود (جدول 3). بنابراین، یک معادله دوتکه‌ای به میانگین داده‌های حاصل از روش‌های مختلف تلقیح برازش داده شد (شکل 1چ). طبق نتایج، با مصرف کود پتاسیم از صفر تا 53 کیلوگرم در هکتار، وزن هزار دانه ثابت (24/3 گرم) باقی ماند و سپس با افزایش هر کیلوگرم کود پتاسیم مقدار آن به میزان 0/0166 گرم افزایش یافت (شکل 1چ). در واقع، مقدار افزایش این صفت نسبت به شاهد حدود 4/9 درصد برآورد گردید. بهمنیار و سودایی‌مشایی (Bahmanyar & Soodaee Mashaee, 2010) گزارش نمودند که مصرف 23 و 30 کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و کلرور پتاسیم موجب افزایش 4/8 درصدی وزن هزار دانه برنج نسبت به شاهد شد. قاسمی میانایی و همکاران (Ghasemi-Mianaie et al., 2014) نیز افزایش 0/96 درصدی وزن هزار دانه برنج را در زمان مصرف 250 کیلوگرم در هکتار کود سولفات پتاسیم گزارش نمودند. در همین راستا، حسین و همکاران (Hussain et al., 2016) اظهار داشتند که مصرف 75 و 105 کیلوگرم در هکتار به‌ترتیب کود نیتروژن و فسفر به‌همراه کاربرد باکتری *Bacillus* sp. موجب افزایش 6/6 درصدی وزن هزار دانه گندم نسبت به شاهد شد. در آزمایشی دیگر، کاربرد ریزجانداران افزاینده رشد به همراه کود سولفات پتاسیم در برنج موجب افزایش وزن هزار دانه به مقدار 1 تا 3 درصد نسبت به شاهد گردید (Gilani et al., 2017).

عملکرد دانه

بر اساس یافته‌ها، مقدار عملکرد دانه از 3170 تا 5000 کیلوگرم در هکتار متغیر بود. روش‌های مختلف تلقیح با باکتری نیز باعث افزایش معنی‌دار این صفت نسبت به شاهد شد. بر اساس یافته‌های مطالعه حاضر، تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه (4857 کیلوگرم در هکتار)، تلقیح در خزانه (4649 کیلوگرم در هکتار) و تلقیح ریشه گیاهچه (4707 کیلوگرم در هکتار) به‌ترتیب باعث افزایش 19/8، 14/6 و 16/1 درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد شدند (جدول 3). برای توصیف روند تغییرات عملکرد دانه در مقابل مصرف کود پتاسیم از یک معادله دوتکه‌ای استفاده شد. نتایج حاکی از توصیف خوب با ضریب تبیین بالاتر از 0/99 این روابط توسط معادله بود (شکل 1ح). بر اساس ضرایب معادله، از شرایط شاهد (عدم مصرف کود) تا زمان مصرف 55 کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم، به ازای هر کیلوگرم افزایش مصرف کود، عملکرد دانه 3/4 کیلوگرم در هکتار افزایش یافت، سپس تا 125 کیلوگرم در هکتار، عملکرد دانه حدود 2/32 برابر مقدار اولیه معادل 7/9 کیلوگرم در هکتار به ازای مصرف هر کیلوگرم کود پتاسیم افزایش نشان داد (شکل 1ح). به عبارت دیگر، میزان افزایش عملکرد دانه به ازای مصرف هر کیلوگرم کود تا 55 کیلوگرم در هکتار پایین‌تر و بعد از آن بیشتر بود که علت آن را می‌توان به دسترسی آسان‌تر و به دنبال آن جذب بیشتر عناصر غذایی به‌ویژه پتاسیم توسط گیاه در مرحله دوم نسبت داد. به طورکلی، مصرف کود سولفات پتاسیم از صفر تا 125 کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار باعث افزایش 18/2 درصدی عملکرد دانه نسبت به شاهد شد (جدول 2).

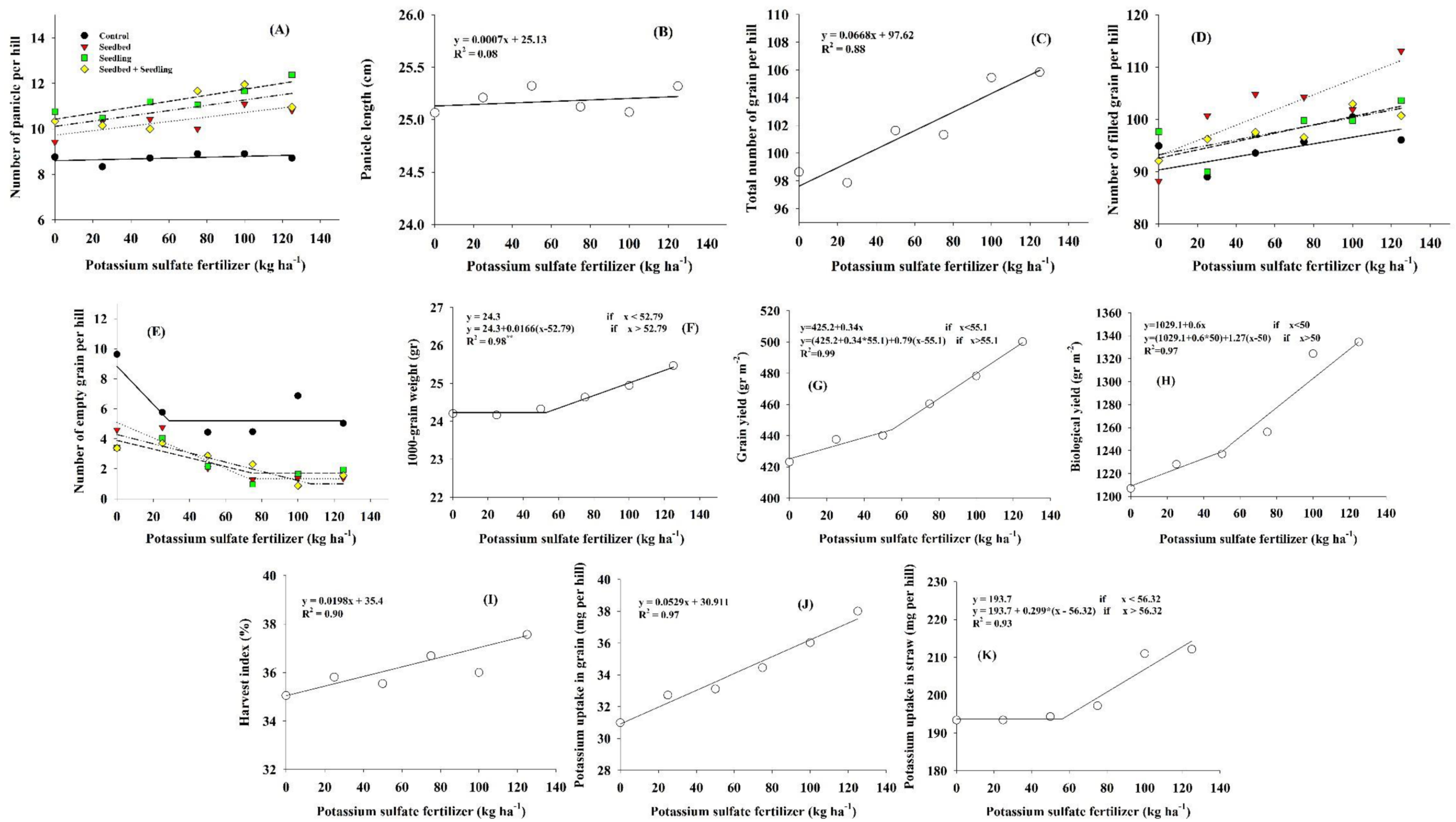
بخشنده و همکاران (Bakhshandeh et al., 2015) بهبود 8/5 درصدی عملکرد دانه برنج تلقیح‌شده با باکتری *Enterobacter* sp. را نیز گزارش نمودند. در همین راستا، بهمنیار و سودایی‌مشایی (Bahmanyar & Soodaee Mashaee, 2010) گزارش کردند که با مصرف 23 و 30 کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن و پتاسیم از منبع کلرور پتاسیم، عملکرد دانه برنج 22/5 درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. Xue et al. (2016) بیان داشتند که عملکرد دانه برنج با مصرف 150 کیلوگرم در هکتار کود کلرور پتاسیم به‌طور خطی تا 23/5 درصد نسبت به شاهد افزایش یافت و سپس تا مصرف کود 360 کیلوگرم در هکتار ثابت باقی ماند. در آزمایشی دیگر، تلقیح بذر گندم (رقم 'میلان') با باکتری *Enterobacter* sp. عملکرد دانه را 17 درصد نسبت به شاهد افزایش داد (Mohammadi Kashkah, 2016). زکوی و همکاران (Zakavi et al., 2012) بیشترین عملکرد دانه برنج را در زمان کاربرد 60 و 90 کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم (به‌ترتیب 5364 و 5495 کیلوگرم در هکتار) گزارش نمودند و کمترین عملکرد دانه به علت کاهش طول خوشه در شاهد (4721 کیلوگرم در هکتار) و یا مصرف 30 کیلوگرم در هکتار کود پتاسیم (4938 کیلوگرم در هکتار) مشاهده گردید. گیلانی و همکاران (Gilani et al., 2017) اظهار داشتند که کاربرد ریزجانداران افزاینده رشد به همراه کود سولفات پتاسیم در برنج موجب افزایش عملکرد دانه حدود 11/2 تا 31/5 درصد نسبت به شاهد شد.

عملکرد بیولوژیک

عملکرد بیولوژیک از 10080 تا 15450 گرم در مترمربع متغیر بود. تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه، تلقیح ریشه گیاهچه و تلقیح در خزانه به‌ترتیب باعث افزایش معنی‌دار 13/2، 8/93 و 8/71 درصدی عملکرد بیولوژیک نسبت به شرایط شاهد شد، اگرچه بین روش‌های مختلف تلقیح از لحاظ آماری اختلاف وجود نداشت (جدول 3). بهاری‌ساروی و پیردشتی (Bahari Saravi & Pirdasht, 2013) افزایش 22/5 درصدی عملکرد بیولوژیک گندم رقم N80 را در زمان تلقیح توأم *Azotobacter* و *Azospirillum* گزارش نمودند. برای توصیف روند تغییرات عملکرد بیولوژیک در مقابل مقادیر مختلف کود پتاسیم از یک معادله دوتکه‌ای استفاده گردید (شکل 1خ). ضریب تبیین بالاتر از 0/97 نشان‌دهندهٔ توصیف خوب این روابط توسط معادله بود. بر اساس ضرایب معادله، با افزایش مصرف کود پتاسیم از شرایط شاهد تا زمان مصرف 50 کیلوگرم در هکتار، به ازای هر کیلوگرم افزایش مصرف کود، عملکرد بیولوژیک 0/6 گرم در مترمربع (معادل شش کیلوگرم در هکتار) افزایش داشت و پس از آن تا 125 کیلوگرم در هکتار، مقدار این صفت حدود 2/12 برابر مقدار اولیه (1/27 گرم در مترمربع، معادل 12/7 کیلوگرم در هکتار) به ازای مصرف هر کیلوگرم کود پتاسیم افزایش نشان داد (شکل 1خ). در مجموع، افزایش سریع‌تر عملکرد بیولوژیک در مرحله دوم را می‌توان مشابه با افزایش عملکرد دانه به دسترسی آسان‌تر و به همراه جذب بیشتر عناصر غذایی به‌ویژه عنصر پتاسیم توسط گیاه نسبت داد. در پژوهش مشابه، توحیدی‌نیا و همکاران (Tohidinia et al., 2014) بیان داشتند که تیمار کود زیستی فسفات بارور 2 (تلقیح بذر ذرت به همراه مصرف سرک باکتری) با میانگین 22580 کیلوگرم در هکتار (9/96 درصد بیشتر از شاهد) بیشترین، و تیمار بدون استفاده از کود زیستی (شاهد) با میانگین 20534 کیلوگرم در هکتار کمترین عملکرد بیولوژیک را به خود اختصاص دادند. در پژوهشی دیگر، افزایش عملکرد بیولوژیک گیاه برنج در زمان کاربرد باکتری‌های *Enterobacter* sp. و *R. aquatitlis* حدود 12/4 تا 30/9 درصد بیشتر از شاهد گزارش شد (Bakhshandeh et al., 2015).

شاخص برداشت

مقدار شاخص برداشت از 30/1 تا 43/4 متغیر و میانگین آن بر اساس کل داده‌های آزمایشی برابر 36/1 بود. تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه، تلقیح ریشه گیاهچه و تلقیح در خزانه به‌ترتیب باعث افزایش 5/78، 5/78 و 5/20 درصدی و مصرف کود سولفات پتاسیم از صفر تا 125 کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار باعث افزایش 7/42 درصدی شاخص برداشت نسبت به شرایط شاهد شد (جدول 3). واکنش این صفت به مقادیر مختلف کود پتاسیم نیز از یک رابطه خطی پیروی کرد (شکل 1د). طبق نتایج، به ازای افزایش هر کیلوگرم کود پتاسیم در هکتار مقدار شاخص برداشت 0/0198 درصد افزایش یافت (شکل 1د). به‌طور مشابه، بخشنده و همکاران (Bakhshandeh et al., 2015) گزارش کردند که حضور باکتری‌های *P. putida* و *R. aquatilis* باعث افزایش شاخص برداشت به‌ترتیب 0/67 و 2/67 درصد در زمان مصرف 75 کیلوگرم در هکتار کود سوپرفسفات‌تریپل شد.



شکل ۱- اثر کود سولفات پتاسیم بر صفات مورد مطالعه (تعداد خوشه در کپه (الف)، طول خوشه (ب)، تعداد کل دانه در خوشه (پ)، تعداد دانه پر در خوشه (ث)، تعداد دانه پوک در خوشه (ج)، وزن هزار دانه (چ)، عملکرد دانه (ح)، عملکرد بیولوژیک (خ)، شاخص برداشت (د)، جذب پتاسیم در دانه (ذ)) و جذب پتاسیم در بقایای برنج (ه)).

Fig. 1- Effect of potassium sulfate fertilizer on studied traits (number of panicle per hill (A), panicle length (B), total number of grain per hill (C), number of filled grain per hill (D), number of empty grain per hill (E), 100-grain weight (F), grain yield (G), biological yield (H), harvest index (I), potassium uptake in the grain (J)) and potassium uptake in straw (K)) of rice

همچنین، افزایش 2 تا 11 درصدی شاخص برداشت در زمان کاربرد ریزجانداران افزاینده رشد به همراه مصرف کود سولفات پتاسیم مشاهده گردید (Gilani et al., 2017). در آزمایشی دیگر، تلقیح گندم با باکتری *Enterobacter* sp. باعث افزایش 29/4 درصدی شاخص برداشت شد (Mohammadi Kashkah 2016). بهاری‌ساروی و پیردشتی (Bahari Saravi & Pirdashti., 2013) افزایش 7/69 درصدی شاخص برداشت گندم را در زمان تلقیح توأم *Azotobacter* و *Azospirillum* گزارش نمودند. علاوه‌براین، اصغری و همکاران (Asghari et al., 2014) نیز بیشترین عملکرد دانه و شاخص برداشت برنج (رقم 'طارم هاشمی') را در زمان تلقیح ریشه با باکتری *P. fluorescens* (به‌ترتیب 11/35 گرم در بوته و 37/2 درصد) و کمترین آن در شرایط شاهد بدون کود (به‌ترتیب 2/09 گرم در بوته و 24/1 درصد) گزارش کردند. این محققین علت افزایش صفت شاخص برداشت در زمان حضور باکتری را به انتقال مجدد بهتر مواد به دانه نسبت دادند.

جذب پتاسیم در دانه و بقایا

محدوده جذب پتاسیم دانه از 22/2 تا 47/4 میلی‌گرم در کپه متغیر بود. این صفت به طور معنی‌داری تحت تأثیر روش‌های مختلف تلقیح و مصرف کود پتاسیم قرار گرفت، اما اثر متقابل بین آن‌ها معنی‌دار نبود (جدول 2). با کاربرد باکتری *Enterobacter* sp. به عنوان تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه، تلقیح ریشه گیاهچه و تلقیح در خزانه به‌ترتیب مقدار جذب پتاسیم در دانه 18/9، 16/1 و 15/9 درصد نسبت به شاهد افزایش یافت. همچنین، افزایش مقدار پتاسیم از صفر تا 125 کیلوگرم در هکتار باعث افزایش 22/6 درصدی این صفت نسبت به شاهد گردید (جدول 3). مقدار افزایش جذب پتاسیم به ازای مصرف هر کیلوگرم کود پتاسیم 0/0529 تخمین‌زده شد (شکل 1ذ). دامنه تغییرات جذب پتاسیم در بقایا از 142/1 تا 286/2 میلی‌گرم در کپه و با میانگین 200/4 میلی‌گرم در کپه بود. روش تلقیح بر جذب پتاسیم در بقایا معنی‌دار، اما مصرف کود پتاسیم و اثر متقابل بین آن‌ها معنی‌دار نشد (جدول 2). کاربرد باکتری *Enterobacter* sp. در تیمارهای تلقیح توأم بذر در خزانه و ریشه گیاهچه، تلقیح ریشه گیاهچه و تلقیح در خزانه به‌ترتیب باعث افزایش جذب پتاسیم بقایا در کپه (13/2، 3/45 و 4/45 درصد) نسبت به شاهد شد (جدول 3). علاوه بر این، با افزایش مصرف پتاسیم از صفر (شاهد) تا 125 کیلوگرم مقدار جذب پتاسیم 9/68 درصد افزایش یافت. بر اساس ضرایب معادله دوتکه‌ایی، با افزایش مصرف کود پتاسیم از شرایط شاهد تا زمان مصرف 56/3 کیلوگرم در هکتار، به ازای هر کیلوگرم افزایش مصرف کود میزان جذب پتاسیم در بقایا به طور خطی و با شیب ثابت، و پس از آن تا 125 کیلوگرم در هکتار، مقدار این صفت حدود 0/3 برابر مقدار اولیه به ازای مصرف هر کیلوگرم کود پتاسیم افزایش نشان داد (شکل 1ه).

علت افزایش جذب پتاسیم در دانه و بقایا را می‌توان به بهبود گسترش ریشه در زمان کاربرد باکتری نسبت داد که نتیجه آن افزایش جذب عناصر غذایی از خاک می‌باشد. علاوه‌براین، حضور این گونه ریزجانداران در خاک باعث انحلال فسفر و پتاسیم نامحلول در خاک و افزایش دسترسی این عناصر برای گیاه خواهند شد (Meena et al., 2016). محققین دیگر افزایش طول و حجم ریشه برنج را به‌ترتیب از 8 تا 13 و از 5 تا 20 درصد در زمان کاربرد باکتری حل‌کننده فسفر و پتاسیم نسبت به شاهد گزارش نمودند (Bakhshandeh et al., 2015). به طور مشابه، تلقیح گیاهچه برنج با باکتری *Enterobacter* sp. موجب افزایش جذب پتاسیم در برگ ، ساقه و ریشه گیاه به‌ترتیب 69/2، 52/9 و 50/0 درصد نسبت به شاهد شد (Bakhshandeh et al., 2017b). کاربرد باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم *Klebsiella* sp. و *Enterobacter* sp. در تنباکو، مقدار ماده خشک و جذب عناصر غذایی را در مقایسه با شاهد افزایش داد. همچنین آن‌ها اظهار داشتند که باکتری‌های حل‌کننده پتاسیم از طریق محلول‌کردن پتاسیم نامحلول در خاک و تبدیل آن به فرم قابل دسترس برای گیاه موجب بهبود جذب این عنصر توسط گیاه و کاهش مصرف کود شیمیایی شدند (Zhang et al., 2014). تلقیح بذر ارقام مختلف برنج با *Pseudomonas* sp. از طریق تولید اکسین موجب بهبود جذب عناصر غذایی در گیاه و دانه برنج شد (Ramezanpour et al., 2010). در آزمایشی دیگر، کاربرد ریزجانداران افزاینده رشد به همراه کود سولفات پتاسیم در برنج موجب افزایش جذب پتاسیم دانه به مقدار 11 تا 40 درصد نسبت به شاهد گردید (Gilani et al., 2017). به‌طورکلی، این ریزجانداران با استقرار در ریشه گیاه و تولید هورمون‌های گیاهی، ویتامین‌ها، سیدروفور، مواد محرک رشد و توانایی انحلال مواد معدنی فسفاته و پتاسه و دیگر

مواد مغذی موجب بهبود عملکرد گیاه میزبان خواهند شد (Ahemad & Kibret 2014).

نتیجه‌گیری

طبق نتایج، کاربرد باکتری (*Enterobacter* sp.) و مصرف کود پتاسیم هر یک به‌طور جداگانه توانستند از طریق بهبود صفات اجزای عملکرد و جذب عناصر غذایی به‌ویژه پتاسیم سبب افزایش عملکرد دانه در واحد سطح شوند. اما در زمان کاربرد توأم آن‌ها نیز عملکردهای بالاتر در مقادیر کاهش یافته کود پتاسیم مشاهده شد. بنابراین، از این روش‌ها به خوبی می‌توان جهت دستیابی به عملکردهای بالاتر در راستای اهداف کشاورزی پایدار تولید برنج استفاده نمود.

سپاسگزاری

بدینوسیله از پژوهشکده ژنتیک و زیست فناوری کشاورزی طبرستان و دانشگاه علوم کشاورزی منابع طبیعی ساری به خاطر حمایت‌های مالی تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

Ahemad, M., and Kibret, M. 2014. Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: current perspective. Journal of King Saud University-Science 26:1-20.

Akbarlou, R. 2013. Effect of potassium and planting method on yield and some agronomical traits of local variety of round-grain rice in Khoy. Journal of Research in Crop Sciences 5:1-14. (In Persian with English Summary)

Anjanadevi, I.P., John, N.S., John, K.S., Jeeva, M.L., and Misra, R.S. 2016. Rock inhabiting potassium solubilizing bacteria from Kerala, India: characterization and possibility in chemical K fertilizer substitution. Journal of Basic Microbiology 56:67-77.

Asghari, J., Ehteshami, S., Rajabi Darvishan, Z., and Khavazi, K. 2013. Investigation of spraying or root inoculation by plant growth promoting bacteria (PGPB) and their metabolites on morphophysiological indices, qualitative indices and yield in Hashemi cultivar of rice. Journal of Plant Process and Function 2:25-39.

Asghari, J., Ehteshami, S.M.R., Rajabi, D.Z., and Khavazi, K. 2014. Study of root inoculation with plant growth promoting bacteria (PGPB) and spraying with their metabolites on chlorophyll content, nutrients uptake and yield in rice (Hashemi cultivar). Journal of Soil Biology 2:21-31. (In Persian with English Summary)

Bahari Saravi, S.H., and Pirdashti, H. 2013. The effect of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and phosphate solubilizing microorganism (PSM) on yield and yield components of wheat (cv. N80) under different nitrogen and phosphorous fertilizers levels in greenhouse condition. Iranian Journal of Field Crops Research 10:681-689. (In Persian with English Summary)

Bahmanyar, M., and Mashaee, S.S. 2010. Influences of nitrogen and potassium top dressing on yield and yield components as well as their accumulation in rice (*Oryza sativa*). African Journal of Biotechnology 9:2648-2653.

Bakhshandeh, E., Pirdashti, H., and Gilani, Z. 2017a. Application of mathematical models to describe rice growth and nutrients uptake in the presence of plant growth promoting microorganisms. Applied Soil Ecology 124: 171-184.

Bakhshandeh, E., Pirdashti, H., and Lendeh, K.S. 2017b. Phosphate and potassium-solubilizing bacteria effect on the growth of rice. Ecological Engineering 103:164-169.

Bakhshandeh, E., Rahimian, H., Pirdashti, H., and Nematzadeh, G.A. 2014. Phosphate solubilization potential and modeling of stress tolerance of rhizobacteria from rice paddy soil in northern Iran. World Journal of Microbiology and Biotechnology 30:2437-2447.

Bakhshandeh, E., Rahimian, H., Pirdashti, H., and Nematzadeh, G.A. 2015. Evaluation of phosphate-solubilizing bacteria on the growth and grain yield of rice (*Oryza sativa* L.) cropped in northern Iran. Journal of Applied Microbiology 119:1371-1382.

Daghighian, N., Habibi, D., Madani, H., and Sajadi, N.A. 2011. The evaluation of effects of the best method and time application of plant growth promoting bacteria on N, P, K assimilation and seed yield in bean (*Phaseolus vulgaris*

L.). Journal of Crop Ecophysiology 3:94-100. (In Persian with English Summary)

Ding, Y., Luo, W., and Xu, G. 2006. Characterisation of magnesium nutrition and interaction of magnesium and potassium in rice. Annals of Applied Biology 149:111-123.

Duy, M., Hoi, N., Ve, N., Thuc, L., and Trang, N. 2016. Influence of *Cellulomonas flavigena*, *Azospirillum* sp. and *Pseudomonas* sp. on rice growth and yield grown in submerged soil amended with rice straw. Recent Trends in PGPR Research for Sustainable Crop Productivity p. 238.

Ebrahimi-Chamani, H., Yasari, E., and Pirdashti, H. 2014. Effects of phosphate solubilizing bacteria and phosphorous levels on rice (*Oryza sativa* L.). Agricultural Advances 3: 56-66.

Esfahani, M., Sadrzadeh, S. M., Kavousi, M., and Dabbagh Mohammadi-Nasab, A. 2005. Study the effect of different level of nitrogen and potassium fertilizers on growth, grain yield, yield components of rice (*Oryza sativa* L.) cv. Khazar. Journal of Crop Sciences 7:226-240. (In Persian with English Summary)

Estefan, G., Sommer, R., and Ryan, J. 2013. Methods of soil, plant, and water analysis. A manual for the West Asia and North Africa region, International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). P. 244.

Fageria, N. 2015. Potassium requirements of lowland rice. Communications in Soil Science and Plant Analysis 46:1459-1472.

Food and Agriculture Organization (FAO). 2014. FAOSTAT/ Productionstat/ Crops [Online]. Available at http://Faostat.Fao.Org/Site/567/Default.aspx. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ghasemi-Mianaie, A., Mobaser, H., Madani, H., and Dastan, S. 2011. Silicon and potassium application facts on loding related characteristics and quantity yield in rice (*Oryza sative* L.) Tarom Hashemi variety. New Findings in Agriculture 5:423-435. (In Persian with English Summary)

Gilani, Z., Pirdashti, H., and Bakhshandeh, E. 2017. Evaluation of Piriformospora indica and Pantoea ananatis on yield, yield components and potassium uptake of rice plant. Journal Sustainable Agriculture and Production science. (In Persian with English Summary)

Hahn, L., Sá, E.L.S.D., Osório Filho, B.D., Machado, R.G., Damasceno, R.G., and Giongo, A. 2016. Rhizobial inoculation, alone or coinoculated with *Azospirillum brasilense*, promotes growth of wetland rice. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 40:e0160006.

Hussain, M., Asgher, Z., Tahir, M., Ijaz, M., Shahid, M., Ali, H., and Sattar, A. 2016. Bacteria in combination with fertilizers improve growth, productivity and net returns of wheat (*Triticum aestivum* L.). Pakistan Journal of Agricultural Sciences 53:633-645.

Lavakush Yadav, J., Verma, J.P., Jaiswal, D.K., and Kumar, A. 2014. Evaluation of PGPR and different concentration of phosphorus level on plant growth, yield and nutrient content of rice (*Oryza sativa*). Ecological Engineering 62:123-128.

Meena, V.S., Maurya, B.R., Verma, J.P., and Meena, R.S. 2016. Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture. Springer. p 350.

Mohammadi Kashka, F., Pirdashti, H., Yaghoubian, Y., and Bahari Saravi, S. 2015. Effect of *Trichoderma virens* and *Piriformospora indica* coexistence with *Enterobacter* sp. on the growth and photosynthetic pigments of pepper (*Capsicum annuum* L.). Journal of Plant Ecophysiology 26:121-133. (In Persian with English Summary)

Mwashasha, R., Hunja, M., and Kahangi, E.M. 2016. The effect of inoculating plant growth promoting microorganisms on rice production. International Journal of Agronomy and Agricultural Research 9:34-44.

Ramezanpour, M., Popov, Y., Khavazi, K., and Rahmani, H. 2010. Genetic diversity and efficiency of indole acetic acid production by the isolates of fluorescent pseudomonads from rhizosphere of rice (*Oryza sativa* L.). American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science 7:103-109.

Sarikhani, M., Aliasgharzad, N., and Malboobi, M. 2013. Improvement of wheat phosphorus nutrition using phosphate solubilizing bacteria. Electronic Journal of Soil Managment and Sustainable Production 3:39-57. (In Persian with English Summary)

Tohidinia, M.A., Mazaheri, D., Bagher-Hosseini, S.M., and Madani, H. 2014. Effect of biofertilizer Barvar-2 and chemical phosphorus fertilizer application on kernel yield and yield components of maize (*Zea mays* cv. SC704).

Journal of Crop Sciences 15:295-307. (In Persian with English Summary)

Xue, X., Lu, J., Ren, T., Li, L., Yousaf, M., Cong, R., and Li, X. 2016. Positional difference in potassium concentration as diagnostic index relating to plant K status and yield level in rice (*Oryza sativa* L.). Soil Science and Plant Nutrition 62:31-38.

Zakavi, D., Deliri, M., Mobzar, H., Dastan, S., and Hosseinzadeh, S.A. 2012. Effect of interrupting irrigation and application of potassium fertilizer on agronomic traits and bending motion of rice (*Oryza sativa* L.) Tarom Local 15th National Rice Conference, Sari, Iran, Pp 1-7. (In Persian with English Summary)

Zhang, C., and Kong, F. 2014. Isolation and identification of potassium-solubilizing bacteria from tobacco rhizospheric soil and their effect on tobacco plants. Applied Soil Ecology 82:18-25.

Journal of Agroecology
Vol. 11, No.2, Summer 2019, p. 561-577

نشریه بوم شناسی کشاورزی
جلد 11، شماره 2، تابستان 1398، ص 577-561

Effect of Plant Growth Promoting Bacteria along with Potassium Fertilizer on Yield and Yield Components of Rice (cv. 'Tarom Hashemi')

K. Shahsavarpour Lendeh[1], H. Pirdashti[2] and E. Bakhshandeh[3*]

Submitted: 13-09-2017
Accepted: 27-02-2018

Shahsavarpour Lendeh, K., Pirdashti, H and Bakhshandeh, E. 2019. Effect of Plant Growth Promoting Bacteria along with Potassium Fertilizer on Yield and Yield Components of Rice (cv. 'Tarom Hashemi'). Journal of Agroecology. 11(2):561-577.

Introduction

Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the most important tropical cereals which is a staple food for about 50% of population around the world, including Iran. The annual grain production of rice in Iran was 2.5 million tones which provided from an area of 0.59 million ha^{-1}. Estimates indicate that rice yield should be enhanced about 65% in the world by the year 2020, especially in developing countries where it is the main food crop. The third macro-nutrient next to nitrogen (N) and phosphorus (P) is known as potassium (K). Potassium is absorbed by roots equal to N and or second after N in some plants like rice. However, it is available to plants about 1-2% of total K in the soil (K^+, soluble forms) while 90-98% of this is unavailable for plant uptake, as a result of the strong binding force between K and other minerals such as mica and feldspar. Therefore, introduce alternative sources of fertilizer such as microbial activation can be an effective way to meet a sustainable agriculture and to decline the use of chemical fertilizers. For this purpose, plant growth promoting rhisobacteria (PGPRs) can be used in rice paddies field. PGPRs influence on plant growth and productivity using both direct (assisting in resource acquisition (nitrogen, phosphorus and essential minerals) or modulating plant hormone levels) and indirect (by decreasing the inhibitory effects of various pathogens on plant growth and development in the forms of biocontrol agents) mechanisms that are fully described in Ahemad and Kibret (2014).

Materials and methods

A field experiment was conducted in a paddy field of Mazandaran province (Babol city) as a split plot arrangement based on randomized complete block design with three replications in 2016. Six levels of potassium sulfate fertilizer (PSF: 0, 25, 50, 75, 100 and 125 $kg.ha^{-1}$) were used as the main plot and four levels of inoculations (non-inoculation as control, seed inoculation in the seedbed condition, seedling root inoculation before transplanting time and combined both previously methods) served as the sub-plots. The experiment was performed under optimal agronomic conditions. Plots were weeded by hand. If necessary, appropriate chemicals were applied to control pests and diseases. A water depth of 3–5 cm was applied in all plots from transplanting time until 2 weeks before harvest maturity (82 days after transplanting). Ten rice plants were randomly harvested at physiological maturity to measure yield components of rice. Actual paddy yield (PY) and biological yield (BY) were also determined at harvesting time by removing of one m^2 of rice plants from each plot. Potassium content in the grain (PCG) and straw (PCS) were measured by the flame photometric method.

Results and discussion

The results indicated that all studied traits were significantly affected by PSF and various inoculation methods, except for panicle length and total number of grain per panicle, but the interaction effect between them were not statistically significant. Various inoculation methods significantly increased panicle number per hill, number of filled grain per panicle, PY, BY, harvest index, PCG and PCS by 8.40-17.8, 3.50-8.30, 14.6-19.8, 8.71-13.2, 5.20-5.70, 15.9-18.9 and 3.45-13.2%, respectively, and the number of empty grain per panicle (NEGP) was decreased by 58.3-61.6% as compared to the control. Furthermore, values of all studied traits

1- MSc Student of Agronomy, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2 and 3- Associate and Assistant Professor, Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan & Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: Bakhshandehsmail@gmail.com)
Doi:10.22067/jag.v11i2.67375

particularly PY (18.2% more than the control), except for NEGP which was decreased, increased with the addition of PSF from zero to 125 kg.ha^{-1}.

Conclusion

The combined inoculation method improve yield components and potassium uptake by rice plant which was defined as the best method. Therefore, this method can be used in reduced potassium fertilizer condition (~25 kg.ha^{-1}) to meet a sustainable rice system production.

Acknowledgements

The authors thank the Genetics and Agricultural Biotechnology Institute of Tabarestan (GABIT) and Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran for providing financial support for this study.

Keywords: *Enterobacter* sp, Paddy yield, Potassium uptake, Rice, Sulfate potassium fertilizer, Yield components.